

Untersuchung des Einsatzpotenzials der Klebtechnik zum Fügen von endlos naturfaserverstärkten Kunststoffen im Automobilbereich

Moira Burnett, Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm, Universität Kassel

Max Schmidt, Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University

Abstract

Aktuell werden NFK immer häufiger im Automobilbereich eingesetzt, wobei sich die Anwendung des nachhaltigen Werkstoffs auf nichtstrukturelle Bereiche beschränkt. Durch den Einsatz eines Naturfasergeleges in Verbindung mit einer duromeren Matrix sollen Verbundwerkstoffe gefertigt werden, die für den strukturellen bzw. semistrukturellen Einsatz geeignet sind. Die im folgenden vorgestellten Ergebnisse zeigen das Potenzial von NFK im Automobilbereich auf.

Einleitung

In den letzten Jahren haben sich vermehrt leichte Verbundwerkstoffe auf dem Markt etabliert, hierzu gehören auch die naturfaserverstärkten Kunststoffe (NFK). Diese Werkstoffe werden auf Grund ihrer positiven Eigenschaften besonders häufig im Bereich der Automobilbranche eingesetzt. Als Herstellungsverfahren für NFK finden bislang hauptsächlich das Form- und Fließpressen sowie das Spritzgießen Anwendung. Diese Methoden sind auf thermoplastische Matrixharze und Fasern kürzerer Länge beschränkt. Eine Verstärkungswirkung ist deshalb gerade im Vergleich zu lang- oder endlosfaserverstärkten Kunststoffen deutlich eingeschränkt. NFK werden deshalb bislang im Wesentlichen im Fahrzeuginnenraum und für nicht mechanisch stark beanspruchte Teile im Außenbereich eingesetzt. Durch die Verwendung von Textilien aus Naturfasergarnen („Endlosfaser“), die gegenüber Stapelfasern etwa 2,5-fach höhere E-Moduln aufweisen, werden NFK-Komponenten auch für lasttragende Baugruppen möglich, besonders, wenn duromere Matrixharze eingesetzt werden. Für den Aufbau lasttragender Systeme ist eine strukturelle und dauerhafte Verbindung der NFK untereinander und mit anderen Materialien Voraussetzung, um die auftretenden Kräfte in das NFK-Bauteil einzuleiten bzw. zu übertragen. Hierzu ist wie bei konventionellen faserverstärkten Kunststoffen (FVK) die fasergerechte Klebung besonders geeignet, da beispielsweise eine Krafteinleitung flächig erfolgen kann und ein Unterbrechen der Faserstruktur durch Bohrungen unterbleibt.

Im Zuge dieser Forschungsarbeit wird geprüft, ob die Entwicklung eines NFK-Verbundes, der aus Garnen bzw. einem Naturfasergelege und einer duromeren Harzmatrix besteht, mittels Vakuuminfusionsprozess möglich ist. Hierbei steht neben der Modifizierung des Infusionsprozesses, die mechanische Performance sowie die anschließende Klebbarkeit der NFK-Verbunde im Fokus.

NFK im Automobilbereich

Zahlreiche Automobilhersteller setzen NFK erfolgreich in ihren Fahrzeugen ein, denn aus energetischer sowie ökologischer Sicht ist der Einsatz von Naturfasern vorteilhaft. Beispielsweise beträgt der Energiebedarf zur Bereitstellung von Flachsfasern nur 5% im Vergleich zur Glasfaserherstellung. Laut Morasch et al., 2011 kann bei einer Bauteilherstellung aus NFK der CO₂-Ausstoß um ca. 30% und der Energiebedarf um etwa 40% reduziert werden.

Naturfasern sind darüber hinaus, mit Ausnahme von Asbest, gesundheitlich unbedenklich und einige Fasern besitzen, wie z. B. Flachs, hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten. Jedoch sind diese guten mechanischen Eigenschaften aktuell großserientechnisch noch nicht auf Verbundwerkstoffe übertragbar, da momentan noch kein Verfahren existiert, mit dem hochorientierte textile Halbzeuge aus Naturfasern mit ausreichend hoher Produktivität hergestellt werden können. Deshalb werden NFK-Bauteile zurzeit lediglich für nicht-strukturelle Bauteile verwendet.

Naturfasern liegen aufgrund ihrer Morphologie als natürliche Stapelfasern endlicher Länge vor. Der Einsatz der Naturfasern erfolgt oft in Form von einfach herstellbaren Vliesen bzw. Wirrfasermatten oder auch als Beimischung von Kurzfasern in Pressmassen auf Basis einer thermoplastischen Matrix. Immer häufiger finden duromere Harzsysteme in der Herstellung von naturfaserverstärkten Kunststoffen Anwendung, allerdings wiederum nur in Kombination mit Fasermatten. Naturfaserverstärkte Duromere finden z. B. im Unterbodenschutz oder im Frontstoßfänger eines Linienbusses Verwendung. In diesen Bereichen sind die faserverstärkten Kunststoffe eher Umwelteinflüssen ausgesetzt und weniger großen Kräften die abgetragen werden müssen.

Da nicht lasttragende Strukturen an die Verbindungstechnik nur niedrige Anforderungen stellen, ist es in der Regel ausreichend, die jeweilige Komponente über die Lebenszeit in Position zu halten. Im Fall struktureller Bauteile müssen jedoch das Bauteil selbst und die Fügestelle wesentlich höhere Betriebslasten aufnehmen bzw. übertragen. Für den Aufbau lasttragender Verbindungen zwischen Karosserie und faserverstärkten Kunststoffbauteilen ist das Fügeverfahren Kleben besonders vielversprechend. Die fasergerechte Klebung ist besonders geeignet, da beispielsweise eine Krafteinleitung flächig erfolgen kann und ein Unterbrechen der Faserstruktur durch Bohrungen unterbleibt (Schürmann 2007). Durch den Einsatz von Klebtechnik wird zudem vermieden, dass Feuchtigkeit durch die Bearbeitungsflächen z.B. Bohrung eintritt. Aufgrund der Hydrophilität von Naturfasern gilt dieser Aspekt als besonders wichtig.

Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften der reinen Faser zeigt dabei, dass Flachsfasern eine mit Glasfasern vergleichbare Steifigkeit aufweisen. Die Zugfestigkeit ist jedoch deutlich geringer. Dieser scheinbare Nachteil ist in der Anwendung von geringer Bedeutung, da Bauteile aus Faserverbundkunststoffen in der Regel hinsichtlich einer erforderlichen Steifigkeit und nicht nach Festigkeit dimensioniert werden. In einigen Bereichen konnte daher ein vergleichbares Einsatzpotenzial zu glasfaserverstärkten Kunststoffbauteilen gezeigt werden [Wambua, 2003; Steuernagel, 2014]. Höhere

mechanische Eigenschaften des Verbundkunststoffes werden insbesondere durch die Verwendung von textilen Halbzeugen mit gestreckter Faserlage erreicht. Die natürlichen Stapelfasern werden hierzu zunächst in einem Spinnprozess zu endlosen Garnen verarbeitet, aus denen dann Verstärkungstextilien wie Gewebe oder ein- oder mehraxiale Gelege gefertigt werden. Die Verwendung von endlosen bzw. gesponnenen Naturfasergelegen vergrößert die Einsatzmöglichkeiten für strukturelle Bauteile aus NFK.

NFK Herstellung

Zu Beginn wird die NFK-Herstellung mit einer klassischen Vakuuminfusion durchgeführt. Mit diesem Verfahren kann zunächst ein Faservolumengehalt von 37% erzielt werden. Da dieser Wert im Vergleich zu konventionellen faserverstärkten Kunststoffen sehr niedrig ist, wird das Infusionsverfahren im Laufe des Projektes modifiziert. Denn bei gleichem Herstellungsverfahren mit Glasfasern und einer Epoxidharzmatrix sind Faservolumengehalte um 50% üblich. Um den Faservolumengehalt zu erhöhen, wird zunächst ein normales VAP-Verfahren (vacuum assisted process) angewendet, bei dem das Textil vollständig mit Harz getränkt wird. Die VAP-Membran verhindert den Austritt von Harz, ermöglicht aber gleichzeitig, dass Luft entweichen kann. Um den Faservolumengehalt weiter zu erhöhen wird anschließend ein Überdruck von 5bar im Autoklav erzeugt. Die Möglichkeit, dass Harz in den Anguss zurückfließen kann ist dabei gegeben. Diese Modifikation des Verfahrens ermöglichen es den Faservolumengehalt auf ca. 42 % zu erhöhen. Der Aufwand und damit die Kosten sind im Vergleich zur üblichen Vakuuminfusion allerdings deutlich erhöht.

Charakterisierung der NFK

Anhand einer lichtmikroskopischen Aufnahme eines Schliffbildes kann der Anteil der Fasern im Verbund und die Homogenität abgeschätzt werden. In Abbildung 1 ist deutlich zu erkennen, dass die Faserbündel in Durchmesser und Form stark variieren und über den Querschnitt nicht gleichmäßig angeordnet sind. Die Faserbündel bzw. einzelnen Garne liegen teilweise homogen mit wenigen Mikrometern Abstand vor. An anderen Stellen sind Bündel wieder mehrere Millimeter voneinander entfernt. Bereiche ohne die keine Fasern aufweisen liegen auch vor. Des Weiteren zeigen auch die Garne erhebliche Unterschiede in den beobachteten Durchmessern. Die Ungleichmäßigkeiten im Querschnitt entstehen durch eine unterschiedliche Anzahl an Stapelfasern in den einzelnen Garnen. Eine inhomogene Faserverteilung und Tränkung kann sich auf die späteren mechanischen Eigenschaften negativ auswirken, siehe Abbildung 1. Auffällig während der Verbundherstellung ist die Schnelligkeit mit der die Naturfasern das Harz aufsaugen, sodass trotz Verfahrensmodifikation keine nachträgliche Harzverteilung mehr möglich ist. Dieses Verhalten führt dazu, dass ein deutlich höherer Harzanteil für die Verbundherstellung mit Naturfasern notwendig ist, als bspw. bei konventionellen glasfaserverstärkten Kunststoffen.

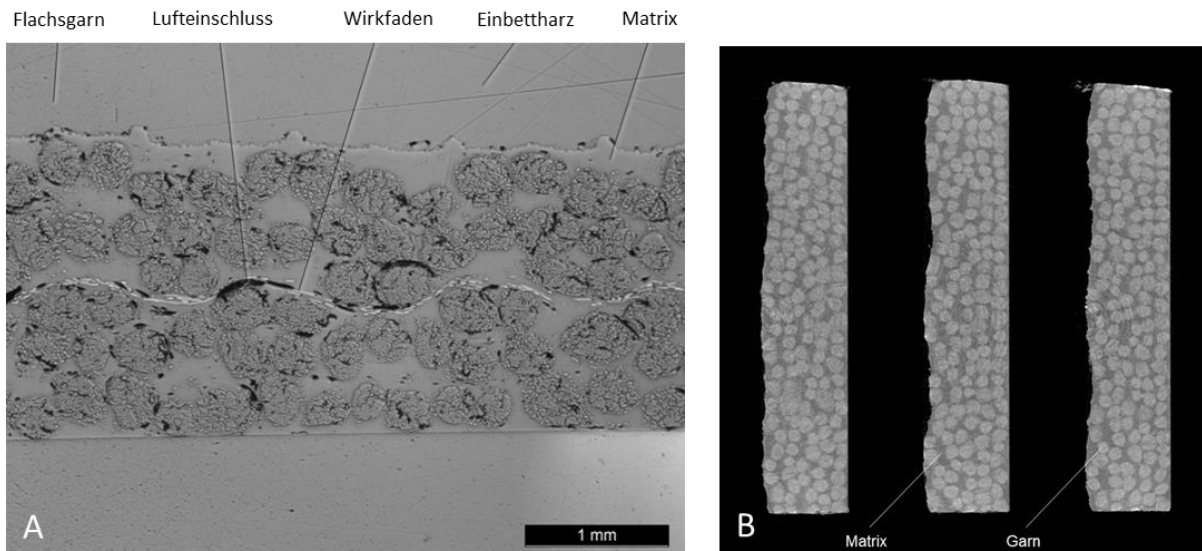


Abbildung 1: A: Schliffbild vom Querschnitt einer NFK-Probe; B: CT-Aufnahme einer NFK-Probe mit Schnitten in verschiedenen Ebenen über die Probenlänge

Zur Charakterisierung der NFK-Verbunde werden gemäß DIN EN 527 Prüfkörper des Typs B hergestellt und zerstörend auf Zug geprüft. In Abbildung 2 sind die ermittelten Zugfestigkeiten zu entnehmen. Aus der Prüfung wird deutlich, dass die Ausrichtung der Fasern einen starken Einfluss auf die Zugfestigkeit ausübt. Im Falle der NFK-Prüfkörper mit einer Lagenausrichtung von $0^\circ/90^\circ$ werden Festigkeiten zwischen 95 MPa und 125 MPa erreicht, dagegen erreichen Prüfkörper mit einer $\pm 45^\circ$ Ausrichtung lediglich Festigkeiten von 50 MPa bis 60 MPa. Bei den Prüfkörpern ($0^\circ/90^\circ$) konnte zudem ein schlagartiges Versagen beobachtet werden und insgesamt liegen die ermittelten Festigkeiten um den Faktor zwei bis vier niedriger als vergleichbare Verbunde aus Glasfasergewebe (Quelle). Bei den Prüfkörpern mit einem symmetrischen Laminataufbau mit $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau ergibt sich ein gutmütiges Versagen, d. h. während der Prüfung kann kein kompletter Bruch beobachtet werden. Im Rahmen dieser Ergebnisse spielt der Einfluss der Matrix einen großen Einfluss, da die mittlere Zugfestigkeit des reinen Harzes bei ca. 80 MPa liegt. Es kann also gefolgert werden, dass die Fasern nicht nur eine Verstärkungswirkung haben, sondern die Kerbwirkung der Flachsfasern bei ausgewählten Kraftangriffswinkel überwiegen. Diese Ergebnisse bieten Raum für weitere Untersuchungsmöglichkeiten.

Zur weiteren Charakterisierung der NFK wird die Biegefestigkeit nach DIN EN 178 ermittelt. Wie zuvor bei der Zugfestigkeit kann auch bei der Biegefestigkeit eine starke Abhängigkeit der Faserausrichtung festgestellt werden. Prüfkörper mit einer Ausrichtung der Fasern in Richtung $0^\circ/90^\circ$ erreichen Festigkeiten von ca. 166 MPa, dagegen kann bei einer Faserausrichtung in $\pm 45^\circ$ lediglich eine Festigkeit von etwa 100 MPa beobachtet werden.

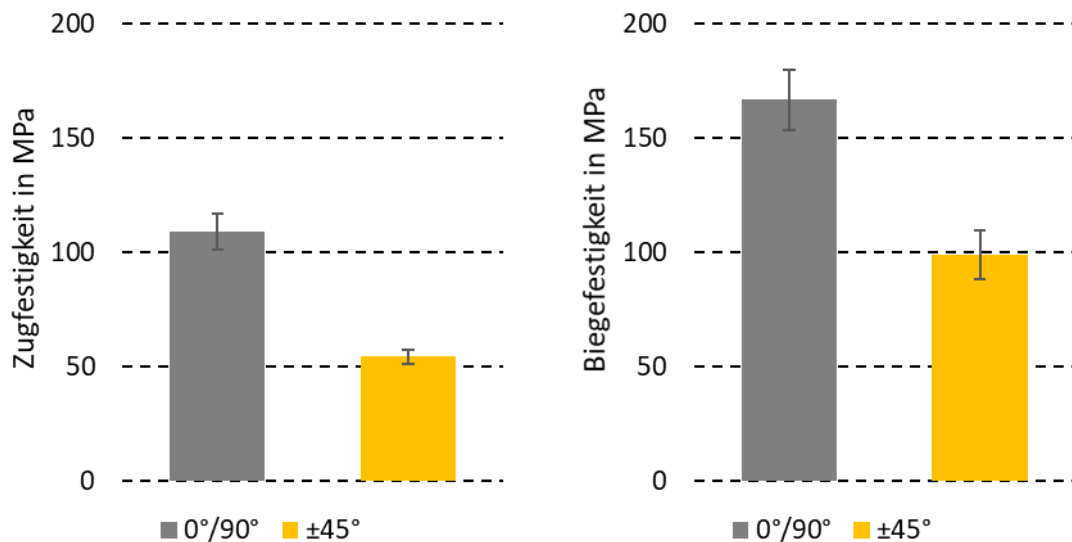


Abbildung 2: Zugfestigkeiten (DIN EN 527) und Biegefestigkeiten (DIN EN 178) von NFK Prüfkörpern mit einem symmetrischen Laminataufbau

Die Bestimmung der Schubfestigkeit nach DIN EN 20337 ergab eine Festigkeit von etwa 55 MPa, somit liegt diese im Bereich von glasfaserverstärkten Kunststoffen (Schürmann 2007). Während der Prüfung der NFK-Substraten kommt es zu keinem schlagartigen Lastabfall, hierdurch besteht eine Resttragfähigkeit bis zum Ende des Prüfweges. Dieses Versagensmuster von NFK ist für dynamische Anwendungen, bei denen schlagartiges Werkstoffversagen vermieden werden soll von Interesse. Bei einem Crash- Lastfall brechen NFK-Komponenten weniger scharfkantig als glasfaserverstärkte Materialien. Zu beachten ist jedoch, dass die Werte für Glasfaserverbünde bei einem Faservolumengehalt von ca. 50 % ermittelt wurde. Die Werte für CFK liegen im Bereich von 80 MPa und sind für NFK nach bisherigen Erkenntnissen nicht erreichbar. Es ist daher davon auszugehen, dass im Bereich der naturfaserverstärkten Kunststoffe noch ein gewisses Potenzial besteht, die mechanischen Kennwerte zu steigern. Dies ist beispielsweise durch angepasste Sizing- Formulierungen und Garne mit wenigen Drehungen möglich.

Neben der Beurteilung der mechanischen Eigenschaften der NFK-Substrate bei Normalklima, wird auch die Performance des Materials nach Alterung bzw. nach Wasserlagerung evaluiert. Hierzu werden ebenfalls Prüfkörper nach DIN EN 527 gefertigt und für 2h, 24, und 48h in ein Wasserbad gegeben, wobei eine Hälfte der Prüfkörper an den Kanten versiegelt wurde. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Zugfestigkeit nach Wasserlagerung dargestellt und es wird deutlich, dass die Festigkeit mit Dauer der Lagerung reduziert wird. Hier ist zu berücksichtigen, dass eine Versiegelung der Seitenkanten den negativen Effekt der Feuchtigkeit auf die mechanischen Eigenschaften dämpft, jedoch nicht gänzlich unterbindet.

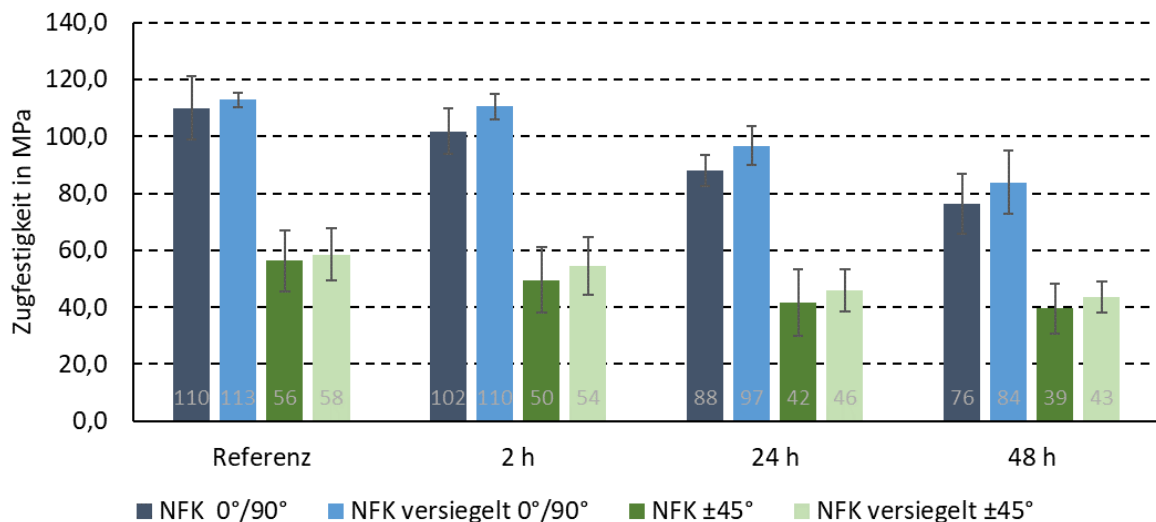


Abbildung 3: Zugfestigkeit von versiegelten und unversiegelten NFK-Prüfkörpern in Abhängigkeit der Faserrichtung (0°/90° und ±45°) und Wasserlagerung (2h, 24h und 48h)

Es konnte beobachtet werden, dass die Prüfkörper trotz Versiegelung an den Seiten erheblich, durch über die Prüfkörperoberfläche eindringende Feuchtigkeit und damit verursachte Quellvorgänge, beschädigt werden. Der Einfluss der Faserausrichtung auf die Festigkeit wird auch nach Alterung nicht schwächer. So beträgt nach einer 24-stündigen Wasserlagerung die Festigkeit von Prüfkörpern mit einer 0/90° Faserausrichtung 97 MPa und in ± 45° Faserrichtung lediglich 46 MPa (für versiegelte Prüfkörper).

Geklebte NFK-Verbunde

Für die Beurteilung der Klebeigenschaften steht zuerst die Fertigung von Zugscherproben mit unterschiedlichen Klebstoffen im Vordergrund. Zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit werden Prüfkörper aus NFK-Substraten und Aluminium entsprechend der Klebstoff-Datenblätter gefertigt und anschließend geprüft. Tabelle 1 gibt die ermittelten Festigkeiten von vier ausgewählten Klebstoffen wieder. Es ist den Ergebnissen zu entnehmen, dass die Klebfestigkeiten der epoxidharzbasierten Klebverbindungen zwischen 22 MPa und 24 MPa liegen und die Festigkeiten der polyurethanbasierten Verbindung bei ca. 15 MPa einzuordnen sind. Anhand der Bruchbilder wird sehr deutlich, dass nach einer gründlichen Reinigung i.d.R. keine Adhäsionsprobleme, die die Klebfestigkeit herabsetzen könnten, vorliegen.

Tabelle 1: erzielte Zugfestigkeiten und Bruchbilder der nach Datenblatt ausgehärteten Klebstoffe

Klebstoff	Chemische Basis	Zugscherfestigkeit in MPa	Bruchbild
A	2-K Epoxid	24,16 (±4,06)	Faser-Matrix/ Substratbruch
B	2-K Epoxid	22,65 (±2,54)	Faser-Matrix/ Substratbruch
C	2-K Epoxid	22,43 (±3,98)	Faser-Matrix/ Substratbruch
D	2-K Polyurethan	14,52 (±2,59)	Adhäsiver Bruch

Die Ergebnisse zeigen, dass der Schwachpunkt des Klebverbundes im NFK-Verbund selbst liegt. Anhand der beobachteten Bruchbilder wird deutlich, dass hauptsächlich zwei Versagensformen auftraten. Zum einen konnte eine mangelnde Festigkeit zwischen den Fasern und der Matrix beobachtet werden (vgl. Abbildung 4) und zum anderen waren interlaminare Brüche im NFK zu erkennen. Hierbei wurden Teile des Fasergeleges aus dem faserverstärkten Kunststoff heraus gelöst und hafteten nach der Prüfung am anderen Fügepartner (vgl. Abbildung 4).

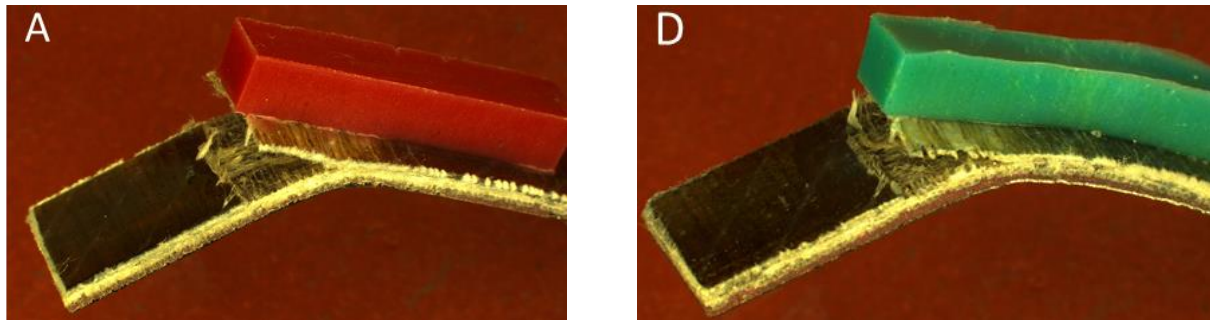


Abbildung 4: Bruchbild: Oberste Harzschicht versagt und Bruch wandert weiter in das Substrat und Faserschicht wird abgelöst

Zur Einschätzung der Alterung wurden Zugscherproben aus NFK und Aluminium einem Klimawechseltest unterzogen. Die Prüfkörper wurden für 12 Tage bzw. 25 Tagen einem Wechseltest (Temp.: -40°C bis 80°C, rel. Luftfeuchtigkeit: 80%) ausgesetzt und nach Ablauf der Testphase auf Zug geprüft.

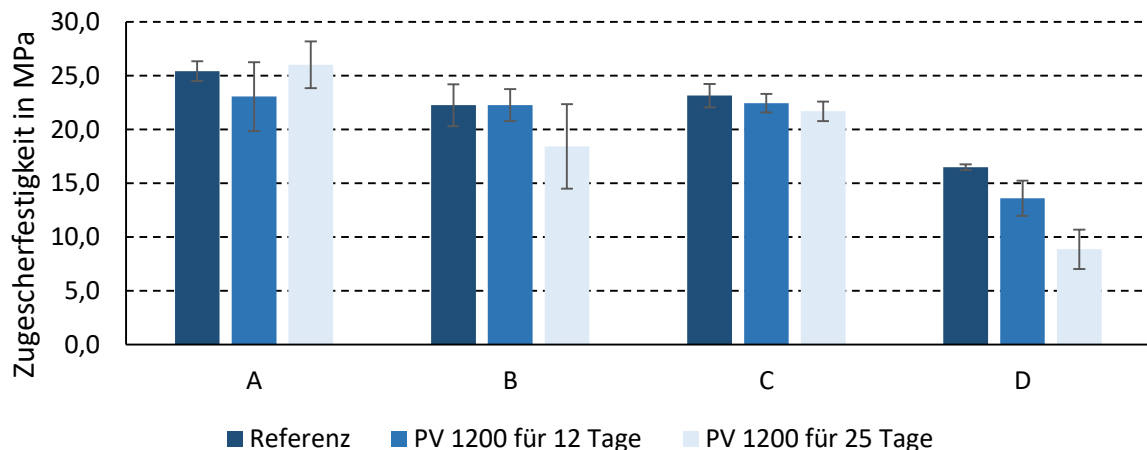


Abbildung 5: Zugscherfestigkeiten ausgewählter Klebstoffe nach 12 bzw. 25 Tagen Klimawechseltest (PV 1200 VW Standard)

Aus Abbildung 5 geht hervor, dass die Zugscherfestigkeiten durch die wechselnden klimatischen Bedingungen teilweise herabgesetzt werden. Der Klebstoff A zeigt nach den 25 Tagen keinen Festigkeitsverlust. Die Klebstoffe auf Epoxidharz Basis weisen Verluste zwischen 17% bzw. 6% auf. Lediglich der Polyurethanklebstoff D performt mäßig und weist nach 25 Tagen eine Zugscherfestigkeit von lediglich 9 MPa auf, wobei hier ein kohäsives Klebstoffversagen vorliegt. Es konnte beobachtet werden, dass die

Prüfkörper durch das Eindringen von Feuchtigkeit Beschädigungen in der Harzmatrix aufwiesen.

Schlussfolgerung

Im Zuge dieser Forschungsarbeit sollte geprüft werden, ob die Entwicklung eines NFK-Verbundes, der aus Endlosfasern bzw. einem Naturfasergelege und einer duromeren Harzmatrix besteht, mittels Vakuuminfusionsprozess möglich ist. Hierbei stand neben der Modifizierung des Infusionsprozesses, die mechanische Performance sowie die anschließende Klebbarkeit der NFK-Verbunde im Fokus.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass naturfaserverstärkte Kunststoffe vielversprechende Eigenschaften für den Automobilbereich aufweisen. Die Ergebnisse zeigten zudem, dass die Klebtechnik ohne aufwändige Oberflächenvorbehandlungen in der Lage ist dauerhafte Klebverbindungen zu realisieren.

Neben den mechanischen Eigenschaften wurde auch der Feuchteinfluss auf die Verbunde beurteilt. Der durchgeführte Klimawechseltest zeigte, dass es erforderlich ist die NFK vor Feuchtigkeit zu schützen. Die Naturfasern nahmen über die Schnittkanten und andere Eintrittsstellen in der Matrixoberfläche sehr schnell Feuchtigkeit auf und es kam zu einer Prüfkörperschädigung, die die Festigkeit herabgesetzt hat. Daher wird ein wichtiger zukünftiger Schwerpunkt für Forschungsarbeiten die Feuchteproblematik bzw. das Alterungsverhalten von naturfaserverstärkten Kunststoffen darstellen. Hierzu könnte die Idee eines ganzheitlichen Bauteilkonzeptes aufgegriffen werden, dass eine Kantenversiegelung vorsieht. Ein anderer Ansatz stellt eine Vorbehandlung des Geleges zur Hydrophobierung der Naturfasern dar.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.795 N/DVS-Nummer 08.098|der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages